0254-6124/2015/35(5)-581–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yang Xiaochao, Zhu Guangwu, Fu Yang, Sun Yueqiang, Liang Jinbao, Jing Tao, Chang Zheng, Shi Chunyan. Analysis of high energy electron environment properties on the middle earth orbit (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(5): 581-587, doi:10.11728/cjss2015.05.581

中地球轨道高能电子辐射环境特性分析

杨晓超[1] 朱光武[1] 符 养[2] 孙越强[1] 梁金宝[1]
荆 涛[1] 常 峥[1] 史春艳[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(北京应用气象研究所 北京 100029)

摘 要 采用中国中地球轨道卫星在太阳活动下降相到上升相的高能电子探测数据, 首次分析研究了该轨道高能电子环境的空间分布、通量强度、时序变化以及对地磁暴活动响应的特性. 结果表明, 中地球轨道高能电子的空间分布范围稳定, 电子通量强度随能量升高而下降; 中地球轨道高能电子环境是一个在不同时间尺度上剧烈变化的动态系统, 该系统可能间歇性地出现 27 天重现性变化, 该系统变化受地磁暴事件调制, 但其对磁暴的响应呈现出非线性特征.

关键词 高能电子辐射, 中地球轨道, 地球辐射带

中图分类号 P 353

Analysis of High Energy Electron Environment Properties on the Middle Earth Orbit

YANG Xiaochao[1] ZHU Guangwu[1] FU Yang[2] SUN Yueqiang[1]
LIANG Jinbao[1] JING Tao[1] CHANG Zheng[1] SHI Chunyan[1]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Beijing Applicational Meteorologic Institute, Beijing* 100029)

Abstract By utilizing data obtained on Chinese satellite in the middle Earth orbit from solar activity descending phase to solar activity ascending phase, the properties of high energy electron environment in the middle Earth orbit are analyzed, such as spatial distribution, flux intensity, temporal variations, and response to geomagnetic storms. The investigating results indicate that the spatial distribution of high energy electron in the middle Earth orbit is stable; the fluxes of electrons decrease with energy increasing; the high energy electron environment is a dynamical system which disturbs evidently on different timescales; the evolvement of this system is stimulated by geomagnetic storms, but the correlation between the evolvement and the storms is nonlinear.

Key words High energy electron radiation, Middle Earth orbit, Van Allen belt

2014-05-22 收到原稿, 2014-08-28 收到修定稿

E-mail: yxc@nssc.ac.cn

0 引言

距地面约 22 000 km 的中地球轨道穿越地球外辐射带中心区域, 运行于该轨道的卫星遇到的最主要的空间环境是来自地球外辐射带的高能电子辐射. 对地球辐射带长期、广泛的观测研究发现, 内辐射带在通常情况下非常稳定, 而外辐射带随着太阳、行星际和磁层不断活动而处于不断重复的衰减–增长的动态变化中 [1−3].

对于地球同步轨道已开展了长期的外辐射带高能电子环境观测研究, 发现当发生磁暴事件时, 外辐射带高能电子通量可能会出现数量级的增长 [4−7]. 由于轨道的局限性, 地球同步轨道观测结果仅能代表外辐射带靠近外边界区域的特征. 利用高倾角近地轨道卫星观测数据, 有研究分析了外辐射带高能电子环境对地磁暴的响应及外辐射带高能电子环境的长期变化特征 [8−10]. 由于这类轨道的高度较低, 分析结果仅能反映磁力线靠近地球部分的外辐射带变化.

2012 年 8 月发射的 Van Allen 探测器, 在入轨之初就观测到前所未见的外辐射带中心形态变化, 外辐射带断裂成两段 [11]. 该结果表明现有的观测结果还远不足以清楚、全面地反映外辐射带变化的形态和物理机制. 有关辐射带的深入长期观测, 对辐射带理论研究具有重要的科学意义. 由于高能电子, 特别是能量大于 1 MeV 的相对论电子具有很强的穿透性, 可以通过内部充放电效应破坏航天器的某些器件, 甚至导致航天器完全失效, 外辐射带高能电子环境是航天器在轨安全的主要威胁之一 [12]. 因此辐射带探测研究具有现实的工程意义.

由于穿越外辐射带中心的轨道特性, 中轨道航天器提供了优越的外辐射带观测平台. 美国在其GPS卫星上装备了高能粒子探测仪器, 并取得了很好的科学成果 [13−14]. 中国在北斗卫星上安装了高能电子探测器, 第一次实现了对中地球轨道高能电子环境的自主探测. 本文利用该仪器的探测数据, 讨论中地球轨道的高能电子环境的特性, 其结果对中地球轨道航天器设计具有重要的参考价值.

1 探测仪器

北斗卫星的高能电子探测器选用半导体传感器, 采用幅度分析方法, 根据粒子在传感器中的能量损失进行粒子种类和能量鉴别. 当高能带电粒子通过准直器进入传感器时, 由于带电粒子的电离作用, 在损失能量的同时使半导体材料内部产生电子空穴对. 这些电子空穴对在高压偏置电场作用下, 收集在传感器的输出端, 产生电荷脉冲. 传感器产生的电荷脉冲与带电粒子在传感器中损失的能量呈正比, 不同能量的粒子在传感器中损失的能量不同, 因此产生的电荷脉冲输出也有所不同. 通过对传感器输出电荷脉冲的幅度进行测量, 可以确定入射粒子的种类和能量. 北斗卫星高能电子探测器能够探测 8 个能量范围的电子, 包括:

0.5∼0.6 MeV, 0.6∼0.7 MeV,
0.7∼0.8 MeV, ⩾ 0.8 MeV,
1.2∼1.4 MeV, 1.4∼1.6 MeV,
1.6∼1.8 MeV, ⩾ 1.8 MeV.

图 1 为北斗卫星 24 h 内的 L (磁壳参数, 定义为地磁场偶极子模型下磁力线与赤道面交点的地心距离与地球半径之比) 轨迹. 图 1 轨迹表明北斗卫星 24 h 中有约 3/4 的时间运行于地球外辐射带并 4 次穿越中心.

2 高能电子环境的空间分布和强度特征

分析北斗卫星观测数据, 得到中地球轨道高能电子环境空间分布. 图 2 给出了 2007 年 5 月至 2008 年 5 月中地球轨道的高能电子观测结果.

如图 2 所示, 中地球轨道高能电子的空间分布区域稳定, 主要分布在 40°S−40°N, 不同能量电子的空间分布区域基本一致; 电子通量强度与其能量相关, 随着能量的升高, 电子通量水平明显下降; 通量强度

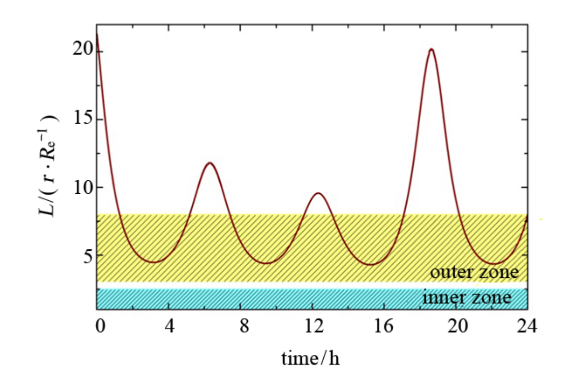


图 1 北斗卫星 24 小时 L 轨迹

Fig. 1 L trace of Beidou satellite in a day

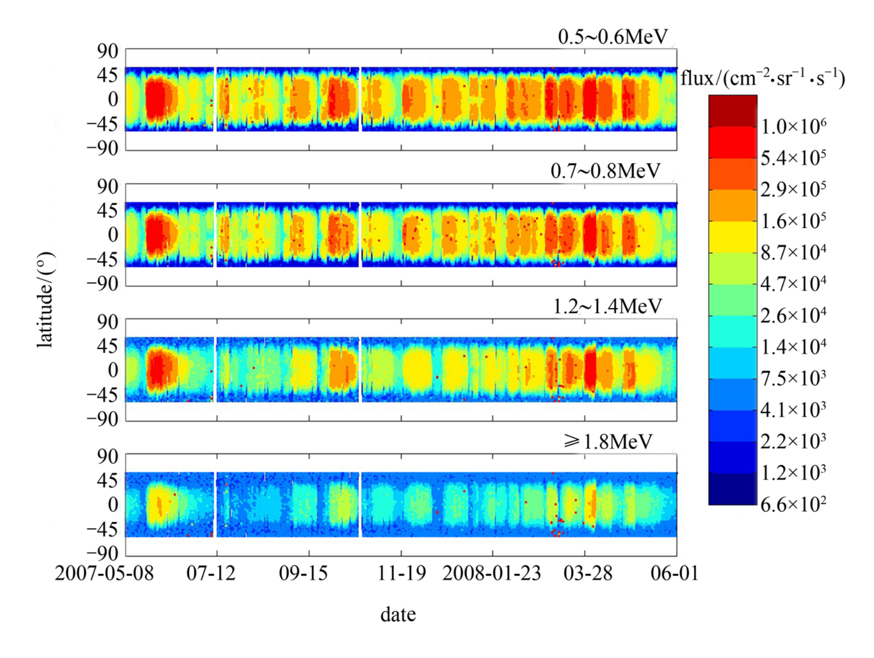


图 2 2007 年 5 月至 2008 年 5 月北斗卫星中轨道高能电子通量观测结果

Fig. 2 High energy electron fluxes from May 2007 to May 2008 detected by Beidou satellite on middle Earth orbit

水平随时间变化波动明显. 表 1 统计了 2007−2011 年各能量范围高能电子在 $L\approx4.5$ 处 (位于地球外辐射带中心附近) 日平均通量的最大和最小值. 在上述观测期内, 电子通量强度的变化幅度均超过三个数量级. 图 2 和表 1 所示结果表明, 中地球轨道高能电子环境是变化剧烈的动态系统.

3 高能电子环境的时序变化特征

图 3(a) 给出了 2007 年 5 月至 2011 年 7 月, $L\approx4.5$ 处 500~600 keV 电子的日平均通量. 可以看出, 在外辐射中心附近, 该能量范围的电子强度呈现不同尺度的时序变化特征. 在图 3(a) 所示时间跨度内, 不同年份的电子通量有数量级的变化. 2007 年 5 月至 2008 年 12 月, 电子日平均通量均超过 $10^4\,\mathrm{cm^{-2}{\cdot}sr^{-1}{\cdot}s^{-1}}$, 2008 年 12 月至 2009 年 1 月通量迅速下降, 2009 年 1 月至 2010 年 3 月的绝大部分时间 (86.4%) 电子日平均通量均低于 $10^4\,\mathrm{cm^{-2}{\cdot}sr^{-1}{\cdot}s^{-1}}$, 2010 年 3 月至 4 月电子通量迅速增长, 2010 年 3 月至 2011 年 7 月的大部分时间 (85.2%) 电子日平均通量超过 $10^4\,\mathrm{cm^{-2}{\cdot}sr^{-1}{\cdot}s^{-1}}$. 此外分析发现在 2007 年 7 月至 2008 年 1 月期间, 如图 3(b) 所示, 电子通量规律地呈现 27 天周期的重现性变化, 随后这种重现性变化消失, 但在 2008 年 6 月至 10 月又再次出现, 如图 3(c) 所示.

表 1 $L\approx4.5$ 处各能量高能电子日平均通量的最大和最小值 (2007−2011 年)

Table 1 Maximum and the minimum of diurnal average fluxes at $L\approx4.5$ with different energy (2007−2011)

能量 /MeV	$f_{\min}$ /$(\mathrm{cm^{-2}{\cdot}sr^{-1}{\cdot}s^{-1}})$	$f_{\max}$
0.5~0.6	150	1.92×10^6
0.6~0.7	100	9.50×10^5
0.7~0.8	300	1.80×10^6
⩾ 0.8	420	3.13×10^6
1.2~1.4	650	1.79×10^6
1.4~1.6	720	9.76×10^5
1.6~1.8	250	6.20×10^5
⩾ 1.8	470	3.65×10^5

图 4(a) 将 $L\approx4.5$ 处 700~800 keV 和 1.4~1.6 MeV 的电子通量与 500~600 keV 电子通量进行比较, 发现随能量升高, 电子通量的时序变化特征无

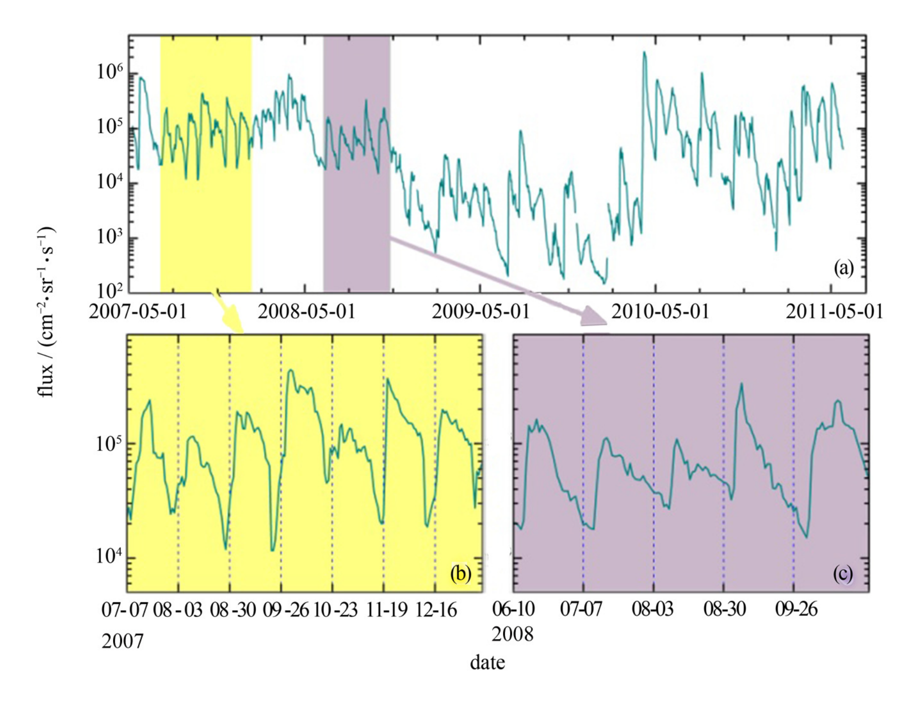


图 3 $L \approx 4.5$ 处高能电子 (500~600 keV) 日平均通量

Fig. 3 Temporal variation of daily average electron fluxes (500~600 keV) at $L \approx 4.5$

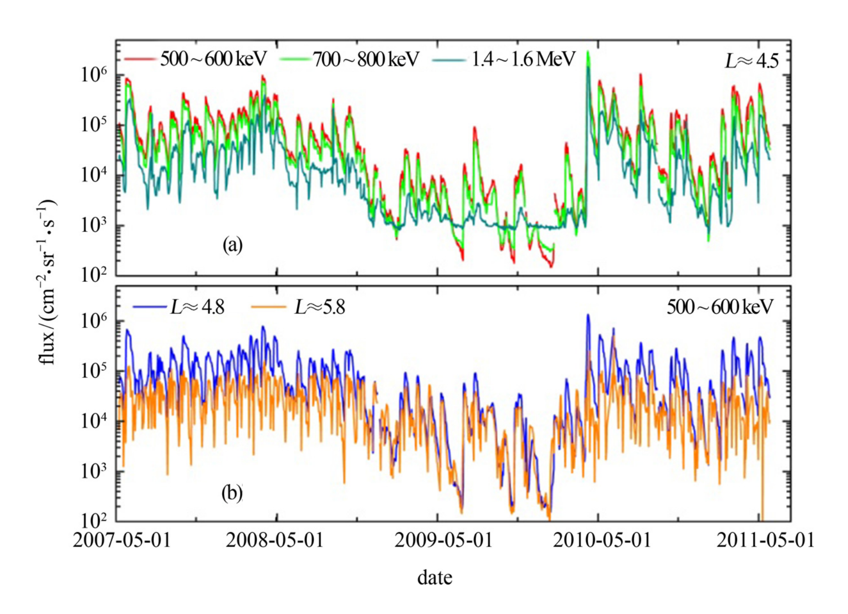


图 4 2007 年 5 月至 2011 年 11 月 500~600 keV, 700~800 keV 和 1.4~1.6 MeV 电子在 $L \approx 4.5$ 处的通量 (a), 以及 500~600 keV 电子在 $L \approx 4.8$ 和 $L \approx 5.8$ 处的通量 (b)

Fig. 4 Daily average fluxes of high energy electron from May 2007 to November 2011, fluxes of electron with energy of 500~600 keV, 700~800 keV, 1.4~1.6 MeV at $L \approx 4.5$ (a), fluxes of electron with energy of 500~600 keV at $L \approx 4.8$ and $L \approx 5.8$ (b)

本质性改变, 2007 年 5 月至 2008 年 12 月和 2010 年 4 月至 2011 年 7 月, 各能量范围的电子通量水平较高, 而 2009 年 1 月至 2010 年 3 月的电子通量水平相对较低; 同样, 2007 年 7 月至 2008 年 1 月和 2008 年 6—10 月, 各能量范围的电子通量均呈现规律的 27 天重现性变化. 图 4(b) 列举了同期 $L \approx 4.8$ 和 $L \approx 5.8$ 处 500~600 keV 的电子通量, 较之 $L \approx 4.5$ 处, 这两处具有大致相同的长期和 27 天重现性时序变化特

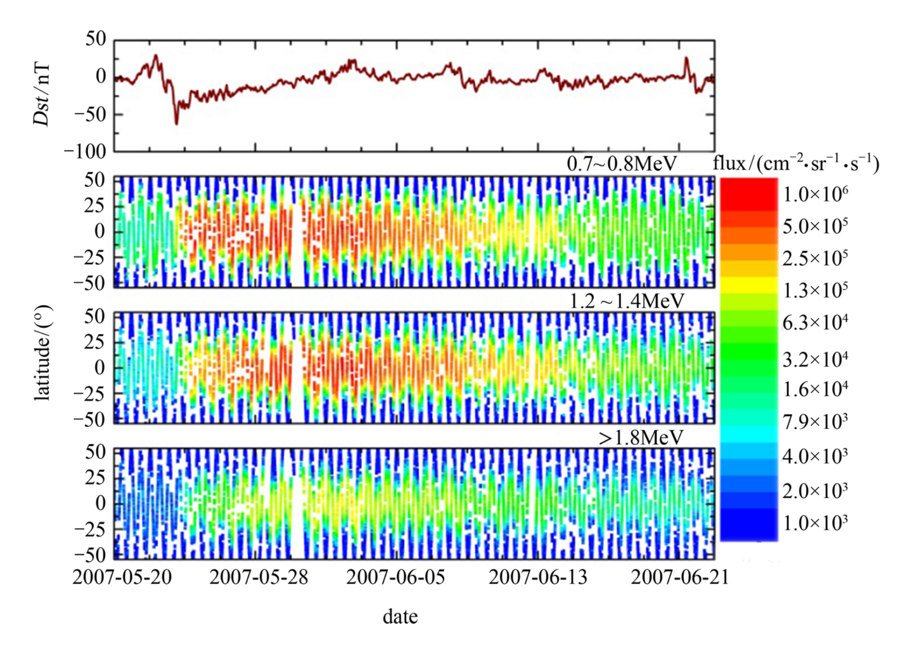


图 5 2007 年 5 月 23 日磁暴前后的 *Dst* 指数和电子通量

Fig. 5 *Dst* index and high energy electron fluxes correlated to geomagnetic storm on 23 May 2007

征, 但 $L \approx 5.8$ 处的通量变化幅度较小. 图 4 所示的不同能量和不同空间的时序变化表明, 外辐射带高能电子的时序变化至少在较宽的能谱范围和空间范围内具有一致性.

4 地磁活动对高能电子环境的调制

分析北斗卫星探测数据发现, 中地球轨道高能电子环境的变化明显受到地磁活动影响. 2007 年 5 月 23 日发生一次 $|Dst|_{\max}=63$ 的中等地磁暴事件, 图 5 列举了这次地磁暴事件前后的地磁活动指数 (Dst) 和三个能量范围的高能电子通量观测结果. 比较图 5 中 Dst 指数和电子通量的时序变化表明, 随着地磁暴恢复相开始, 在 40°S−40°N 空间范围内, 各能量的高能电子通量出现增长. 图 6 所示为 5 月 20 日至 6 月 20 日各能量高能电子的日平均通量, 5 月 23 日高能电子日平均通量开始增长, 5 月 29 日各能量范围的日平均通量同时达到峰值, 与暴前水平相比各能量范围的增长幅度均超过一个数量级, 随后日平均通量开始缓慢衰减, 直至 6 月 20 日通量仍高于暴前水平.

图 7 列举了 2007 年 11 月 20 日磁暴事件前后三个能量范围的高能电子通量观测结果 ($|Dst|_{\max}$=71),

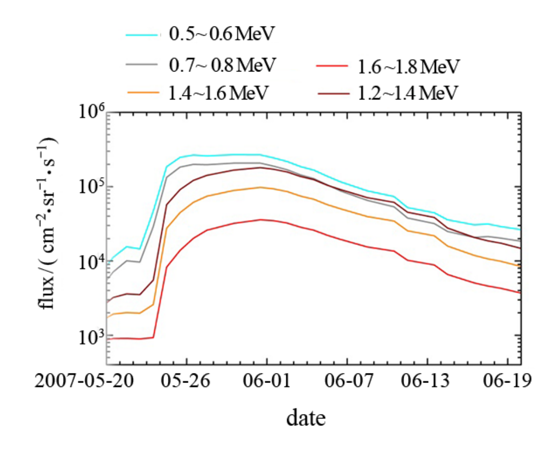


图 6 2007 年 5 月 20 日至 6 月 20 日高能电子日平均通量

Fig. 6 Daily average fluxes of high energy electrons from 20 May to 20 June in 2007

这次事件中高能电子通量的增长同样开始于地磁暴恢复相, 发生增长的空间范围也同样处于 40°S−40°N. 与图 6 类似, 图 8 列举了这次地磁暴前后的高能电子日平均通量.

比较图 6 和图 8 发现, 两次地磁暴事件导致的高能电子通量变化呈现不同特征. 虽然 11 月 20 日地磁暴略强, 但其导致的高能电子通量增长明显弱于 5 月 23 日磁暴, 各能量范围的增长幅度均未达到一个量级, 这表明虽然中轨道高能电子环境受地磁活动调

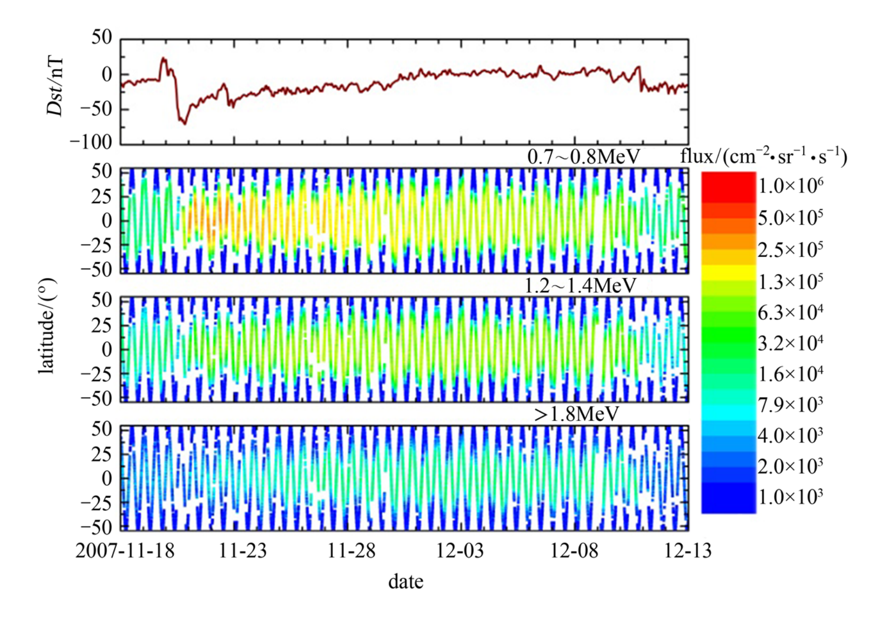


图 7 2007 年 11 月 20 日磁暴前后的 *Dst* 指数和电子通量

Fig. 7 *Dst* index and high energy electron fluxes correlated to geomagnetic storm on 20 Nov. 2007

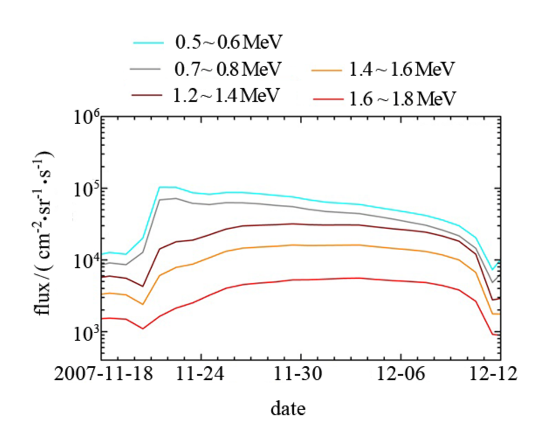


图 8 2007 年 11 月 18 日至 12 月 12 日高能电子日均通量

Fig. 8 Daily average fluxes of high energy electrons from Nov. 18 to Dec. 12, 2007

制, 但对地磁暴的响应是非线性的, 较强的地磁暴事件可能导致较弱的高能电子通量增长. 5 月 23 日磁暴后, 各能量范围的电子均在 6 月 1 日达到最大值; 而 11 月 20 日磁暴后, 能量 $<$ 0.8 MeV 的电子在 11 月 21 日达到通量峰值, 随后缓慢衰减, 能量 $>$ 1.2 MeV 的电子增长缓慢, 直至 12 月 3 日才达到通量峰值.

5 结论

对中地球轨道高能电子环境空间分布和通量强度特征的研究表明, 在该轨道上高能电子主要稳定分布在 40°S−40°N, 不同能量电子的空间分布区域基本一致; 电子通量随能量升高而明显下降; 在 2007−2011 年期间, 各能量范围电子通量强度的变化幅度均超过三个数量级.

研究表明, 中地球轨道高能电子环境是变化剧烈的动态系统, 发现其具有两个明显的时序变化特征. 其一, 高能电子通量呈现时间尺度超过数年的变化; 其二, 高能电子通量间歇性地出现以 27 天为周期的波动. 进一步分析时序变化与电子能量、空间位置的相关性表明, 上述时序变化至少在较宽的能谱范围和空间范围内具有一致性. 分析中轨道高能电子环境对地磁暴的响应特性发现, 该系统对地磁暴的响应是非线性的, 较强的地磁暴事件可能导致较弱的高能电子通量增长.

利用历时 4 年的北斗卫星观测结果, 系统地讨论中地球轨道高能电子环境的空间分布、通量强度、时序变化及对地磁暴的响应特性. 由于该轨道穿越地球外辐射带中心, 研究结果在较宽时间尺度范围上, 反映了外辐射带中心的基本特性. 所讨论的时间区间为 2007−2011 年, 处于太阳活动相位的下降相到上升相, 因此本文分析得到的中轨道高能电子环境特性, 在时间上限于上述太阳活动相位, 其他太阳活动相位的特性还有待后续观测研究.

参考文献

[1] Baker D N, Blake J B, Callis L B, *et al.* Relativistic electron acceleration and decay time scales in the inner and outer radiation belts: SAMPEX [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**(3):409-412

[2] Baker D N, Kanekal S G, Li X, *et al.* An extreme distortion of the Van Allen belt arising from the Halloween solar storm in 2003 [J]. *Nature*, 2004, **432**(7019):878-881

[3] Goldstein J, Kanekal S, Baker D N, *et al.* Dynamic relationship between the outer radiation belt and the plasmapause during March—May 2001 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(15):L15104

[4] Baker D N, Pulkkinen T I, Li X, *et al.* Coronal mass events: ISTP [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A8): 17 279-17 291

[5] Baker D N, Pulkkinen T I, Li X, *et al.* A strong CME-related magnetic cloud interaction with the Earth's magnetosphere: ISTP observations of rapid relativistic electron acceleration on May 15, 1997 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15):2975-2978

[6] Iles R H, Fazakerley A N, Johnstone A D, *et al.* The relativistic electron response in the outer radiation belt during magnetic storms [J]. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**(7):957-965

[7] Selesnick R S, Blake J B. Radiation belt electron observations following the January 1997 magnetic cloud event [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(14):2553-2556

[8] Li X, Baker D N, Temerin M, *et al.* Multisatellite observations of the outer zone electron variation during the November 3—4, 1993, magnetic storm [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A7):14 123-14 140

[9] Li X, Baker D N, Kanekal S G, *et al.* Long term measurements of radiation belts by SAMPEX and their variations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(20):3827-3830

[10] Yang X, Wang J. Observation results of relativistic electrons detected by Fengyun-1 satellite and analysis of Relativistic Electron Enhancement (REE) events [J]. *Sci. China: G*, 2008, **51**(12):1947-1956

[11] Baker D N, Kanekal S G, Hoxie V C, *et al.* A long-lived relativistic electron storage ring embedded in Earth's outer Van Allen belt [J]. *Science*, 2013, **340**(6129):186-190

[12] Czeremuszkin G, Latreche M, Wertheimer M R. Charging/discharge events in coated spacecraft polymers during electron beam irradiation in a scanning electron microscope [J]. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2001, **185**(24):88-99

[13] Reeves G D, Baker D N, Belian R D, *et al.* The global response of relativistic radiation belt electrons to the January 1997 magnetic cloud [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(17):3265-3268

[14] Reeves G D, Spence H E, Henderson M G, *et al.* Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts [J]. *Science*, 2013, **341**(6149):991-994

[15] Reeves G D, McAdams K L, Friedel R H W, *et al.* Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(10):1529-1532